Вестник Донского государственного технического университета. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006. 2018. Т. 18, № 2. С. 146–156
Vestnik of Don State Technical University. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006 2018. Vol. 18, no. 2, pp. 146–156

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 532.5, 004.94 DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора*

А. И. Уколов[1], В. П. Родионов[2]**
[1] Керченский государственный морской технологический университет, г. Керчь, Республика Крым, Российская Федерация
[2] Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Российская Федерация

Modeling the inside defect of the jet cavitator ***

A. I. Ukolov[1], V. P. Rodionov[2] **
[1] Kerch State Marine Technological University, Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation
[2] Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation

Введение. Статья посвящена исследованию работы гидродинамического кавитатора, используемого при эрозийном воздействии на поверхность твердого тела, а также оптимизации структуры устройства для увеличения разрушительной способности кавитационной струи. В работе рассмотрено влияние единичного дефекта внутренней поверхности комбинированного сопла на объемную долю содержания пара и геометрию области кавитации. Целью работы является выявление методом численного моделирования закономерностей влияния дефекта внутренней поверхности кавитатора различной величины на гидродинамические и кавитационные характеристики сопла.
Материалы и методы. Использованы возможности программного пакета конечно-элементного анализа ANSYS Workbench и интегрированного в него модуля оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов ANSYS CFX**.** В основу моделирования положены экспериментальные данные, полученные при истечении воды в кавитационном режиме из исследуемого сопла на специально разработанном лабораторном стенде.
Результаты исследования. Получены и представлены графические зависимости объемной доли содержания пара, полного давления и длины кавитационной области от расстояния вдоль оси струи при различной величине дефекта. Выявлены две фазы течения кавитационной струи в неидеальном кавитаторе, и показано влияние этого перехода на распределение скоростей в сечении устройства.
Обсуждение и заключения. Наличие внутреннего дефекта на поверхности расходящегося конусного участка комбинированного сопла размером менее четверти диаметра центрального цилиндрического участка может не вызывать визуальных изменений в геометрии области кавитации, однако значительно снижает эрозийную способность кавитационной струи. Дальнейшее увеличения дефекта приводит к полному подавлению кавитации потока, но

Introduction. The investigation of the hydrodynamic cavitator operation used under the erosion impact on a solid body surface, and of the device structure optimization for increasing the damage capability of the cavitating jet is presented. The effect of a sporadic defect of the combined nozzle inside on the volume fraction of the vapor content and the cavitation region geometry is considered. The work objective is to identify the influence pattern of the inside defect of cavitators of various sizes on the hydrodynamic and cavitational characteristics of the nozzle through numerical modeling.
Materials and Methods. The features of the ANSYS Workbench finite-element analysis software package and the integrated optimization module of the development and design process in the domain of the computational fluid dynamics ANSYS CFX are used. The simulation is based on the experimental data obtained under the nozzle water discharge at a specially designed laboratory bench under the cavitation condition.
Research Results. Graphic dependences of the volume fraction of the vapor content, total pressure and the length of the cavitation region on the distance along the axis of the jet for different defect sizes are obtained and presented. Two phases of the cavitating jet flow in a nonideal cavitator are identified, and the transition effect on the velocity distribution in the device section is shown.
Discussion and Conclusions. The occurrence of an internal defect on the surface of the conical pattern of a combined nozzle with the size of less than a quarter-diameter of the central cylindrical portion may not cause visual changes in the cavitation region geometry, but it significantly reduces the erosive capacity of the cavitation jet. A further defect increase results in a total suppression of the cavitation flow, but maintains its

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: vik-rodio@yandex.ru; ukolov_aleksei@mail.ru
*** The research is done within the frame of independent R&D.



сохраняет его динамические характеристики. Полученные результаты способствуют усовершенствованию конструкций гидродинамических кавитаторов, улучшению их эрозийного воздействия при использовании кавитации для очистки подводных конструкций и механизмов.

dynamic behavior. The obtained results contribute to the improvement of the hydrodynamic cavitators design, to the enhancement of their erosive impact with the use of cavitation for cleaning underwater structures and mechanisms.

Ключевые слова: кавитатор, затопленная струя, комбинированное сопло, дефект, давление, компьютерное моделирование, ANSYS CFX.

Keywords: cavitator, immersed jet, combined nozzle, defect, pressure, computer simulation, ANSYS CFX.

Образец для цитирования: Уколов, А. И. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора / А. И. Уколов, В. П. Родионов // Вестник Дон. гос техн. ун-та. — 2018. — Т.18 № 2. — С.146–156. DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

For citation: A.I. Ukolov, V.P. Rodionov. Modeling the inside defect of the jet cavitator. Vestnik of DSTU, 2018, vol. 2, no.2, pp. 146–156 DOI : 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156

Введение. Кавитация представляет собой многофазное и сложное физическое явление, определяемое как образование пузырьков пара в жидкости, когда давление локально падает ниже давления насыщенного пара. Рост пузырьков пара в метастабильной жидкости был впервые исследован Рэлеем [1], который представил приближенное аналитическое решение для роста сферически-симметричного пузырька только с учетом инерционной силы. Впоследствии исследования по процессу роста пузырьков проводились и проводятся во многих работах [2–4].

Кавитация классифицируется безразмерным параметром — числом кавитации:

$$\chi = \frac{2\left(p - p_н\right)}{\rho \upsilon^2}$$

где p — противодавление в затопленной полости, $p_н$ — давление насыщенных паров жидкости при температуре окружающей среды, ρ — плотность жидкости, υ — скорость потока. С уменьшением числа кавитации, путем увеличения скорости жидкости, наблюдается суперкавитация, которая заключается в образовании устойчивой газо-паровой области.

В ранние годы кавитация была нежелательным явлением, поскольку наносила большой ущерб гидравлическим машинам, турбинам и насосам, что приводило к разным уровням потери их эффективности в зависимости от интенсивности кавитации. Однако с увеличением числа исследований по кавитационному поведению было доказано, что кавитационные струи могут быть практически применимы во множестве полезных приложений. Кроме уже широко используемого явления ускорения химических реакций при приготовлении эмульсий и суспензий [5, 6], появляются новые современные технические решения использования суперкавитации. Среди них широко исследуемая экспериментально и теоретически [7, 8], в том числе и с использованием программных пакетов моделирования гидродинамических процессов [9–12], проблема снижения сопротивления движению подводных высокоскоростных аппаратов. Отдельно следует выделить область разработки и проектирования дизельных тепловых двигателей, в которых кавитация применяется не только для приготовления водно-дизельной эмульсии [13], но и серьезно влияет на коэффициент расхода топлива систем впрыска под высоким давлением [14].

Применение кавитационных струй главным образом связано с локальным, резким увеличением давления и температуры, возникающим в результате коллапса кавитационных пузырьков, а также с довольно сильными колебаниями давления, вызванными соударением кавитационной струи с твердой поверхностью. В более конкретных выражениях может быть получено давление в приближении 10 ГПа и температура выше 5000 К во время пикосекундного коллапса кавитационных пузырьков [15], что вызывает быстрое разрушение хрупких материалов. Более того, процесс схлопывания кавитационных пузырьков способен возбуждать ударные волны и высокоскоростные микроструйки, которые считаются основной механической причиной сильной эрозионной способности кавитационных струй [16–18]. По этой причине кавитационную эрозию применяют при очистке подводных конструкций и механизмов от загрязнений, биологических обрастаний и прочих нежелательных образований [18–22]. При эксплуатации морских судов, базирующихся в теплых морях, возникает большая проблема обрастания их подводной части различными моллюсками и балянусом. Наиболее эффективным и современным способом очистки от обрастаний поверхностей под водой является гидродинамический, использующий как динамическое воздействие, так и кавитационный эффект. В некоторых случаях, например, при обработке пластмассовых и стеклопластиковых корпусов, кавитационная очистка — единственное возможное решение во избежание повреждений поверхности.

Методы усиления интенсивности кавитации струй привлекли к себе значительное внимание в течение последних нескольких лет. При решении этого вопроса многие исследователи фокусируются на механизмах генерации, роста и коллапса кавитационных пузырьков, геометрии кавитационной области за счет оптимизации структуры сопел для создания более разрушительных кавитационных струй [23].

Для изготовления сопловых насадок и кавитаторов, которые в дальнейшем используются для создания струйных потоков жидкости, истекающей из них, требуется специальное оборудование. Это должны быть прецизионный станок, способный изготовить изделие с наименьшим биением шпинделя, специальный инструмент для данного вида сопловой насадки и строгое соблюдение технологического процесса, разработанного механиком-технологом. Чаще всего при изготовлении сопловых насадок не соблюдается методика их изготовления, и они не отвечают требованиям технического задания.

Долгое время исследование влияния дефектов и шероховатости внутренней стенки кавитаторов на поток и кавитационную характеристику сопла рассматривались как бесполезный параметр в общих исследованиях. Поэтому, несмотря на большое количество работ выполненных по моделированию геометрий или структур сопел, исследование дефектов обработки внутренней поверхности сопла и их влияние на кавитационную эрозию еще не было выполнено. Вместе с тем, шероховатость поверхности может иметь значительные последствия для генерации кавитационных пузырьков, длины кавитационной области, распределения объемной доли пара.

Кроме того, исследования кавитации в сопле инжектора дизельного двигателя показали, что при увеличении шероховатости внутренней поверхности, массовый расход и коэффициент расхода сначала возрастают, а затем уменьшаются [14]. Основываясь на анализе вариаций объемной доли пара и средней скорости потока на выходе из отверстия, было сделано заключение, что определенный уровень черновой обработки внутренней стенки отверстия может изменить характеристики потока за счет значительного подавления кавитации внутри сопла.

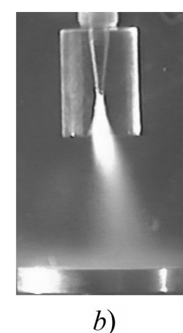
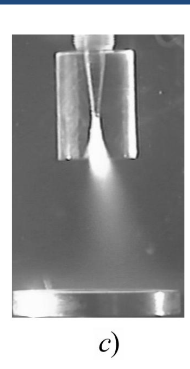
Таким образом, цель данной работы — исследовать методом численного моделирования влияние наличия дефектов внутренней поверхности кавитатора на кавитационные характеристики сопла, используемого для эрозийного воздействия при обработке твердых материалов.

Материалы и методы

Экспериментальные данные. С помощью визуальных наблюдений истечения струйных потоков из сопловых насадок можно частично выявлять некачественно изготовленные изделия. Однако окончательную оценку качественного изготовления можно дать только после комплекса испытаний изделия на специально разработанном стенде [24, 25], оборудованном чувствительными датчиками и контрольной аппаратурой.

Сопловые насадки, выполняющие роль возбудителей кавитации (кавитаторы), наиболее чувствительны к качеству их изготовления. При различных значениях гидростатического давления в окружающей затопленную струю жидкости кавитационный поток, истекающий из кавитатора изготовленного некачественно, может изменять свою структуру, направление движения, что существенно снижает эрозионную способность кавитации.

На рис. 1 представлены фотографии затопленных струй, истекающих из кавитатора, сделанного из прозрачного материала. Давление, подводимое к кавитатору — $p_{вх}$=10МПа, а противодавление в затопленной около кавитатора области изменяется в интервале $p_к$=0,1–0,4 МПа. На рис.1 хорошо просматривается тот факт, что с увеличением противодавления происходит смещение зоны скопления газопаровых пузырьков (каверны) струйного потока вправо. Этот факт позволяет судить о некачественном изготовлении внутренней поверхности кавитатора. Разработанный гидрокавитационный комплекс [24, 25] позволяет обнаружить следствие наличия дефекта обработки сопловой насадки. Причины искажения формы кавитационной струи можно выяснить при рассмотрении заведомо известной погрешности изготовления. Однако точно задать геометрию, размер и расположение нарушения плоскостности внутренней поверхности кавитатора — не простая практическая задача. Решить подобную проблему позволяет исследование гидродинамической кавитации при помощи компьютерного моделирования струйного истечения.

a) *b*) *c*)

Рис. 1. Вид на истечение затопленных струй при различных параметрах противодавления в окружающей струю жидкости:
а — противодавление $p_к$ = 0,1 МПа, *b* — $p_к$ = 0,2МПа, *c* — $p_к$ = 0,4 МПа

Fig. 1. View of immersed jet discharge at various backward pressure parameters in ambient liquid: a —backward pressure p_k = 0.1MPa, b — p_k = 0.2MPa, c — p_k = 0.4MPa

Моделирование гидродинамических процессов средствами пакета конечных элементов ANSYS CFX — инструмент, который уже широко используется для оптимизации и проектирования различных частей гидродинамических устройств и их многофункционального анализа. ANSYS CFX является высокопроизводительной программой вычислительной гидродинамики, обеспечивающей надёжное и быстрое решение широкого круга задач, связанных с течениями жидкостей и газов, в том числе и с учетом кавитации [26–29].

Методика численного моделирования. При моделировании использована функция кавитации в ANSYS CFX, которая основана на уравнении Рэлея-Плессета:

$$R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{2}{3}\left(\frac{dR}{dt}\right)^2+\frac{2\sigma}{\rho R}=\frac{p_{\text{Н}}-p}{\rho} \qquad (1)$$

где R — радиус кавитационного пузырька, $p_н$ — давление внутри пузырька (в модели — давление насыщенных паров), p — локальное давление в жидкости (абсолютное давление CFD-решателя), ρ — плотность жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

Поскольку решить уравнение (1) в общем виде невозможно, в модели Рэлея-Плессета ANSYS CFX его упрощают, пренебрегая вторым порядком и не учитывая поверхностное натяжение жидкости:

$$\frac{dR}{dt}=\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\,.$$

Скорость изменения объема пузырьков пара рассчитывается как

$$\frac{dV}{dt}=\frac{d}{dt}\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)=4\pi R^2\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\,,$$

а скорость изменения массы

$$\frac{dm}{dt}=4\pi R^2\rho_g\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\,.$$

Уравнения, выражающие соотношения масс выделившегося и сконденсированного пара, принятые в расчете, имеют вид [10]:

$$m^+=F^+\frac{3\alpha\rho_g}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\quad(p<p_H)$$

$$m^-=-F^-\frac{3\alpha_0(1-\alpha)\rho_g}{R_0}\sqrt{\frac{2}{3}\frac{p_H-p}{\rho}}\quad(p>p_H)\,,$$

где α_0 — коэффициент связи объемной доли пара с массовой; R_0 — начальный радиус пузырька, ρ_g — плотность паровой фазы, F^+, F^- — константы моделирования.

Модель Рэлея-Плессета учитывает два фактора: скорость роста пузырька и статистический характер распределения пузырьков в кавитационном потоке. Объемная доля пара в ячейке учитывается статистически на основе определения числа зародышей n и их радиуса R_0 и определяется по формуле:

$$\alpha=\frac{4}{3}\pi R_0^3 n\,.$$

Модель кавитации Рэлея-Плессета, реализуемая в ANSYS CFX, требует задания таких параметров, как средний диаметр пузырька и давление насыщенного пара. По данным разных авторов [30–32], радиус пузырька в конце сжатия R_{min}, как правило, находится в пределах 10^{-7}–10^{-8} м при начальном радиусе R_0=1×10^{-6} м. Таким образом, объем пузырька изменяется не менее, чем в 1000 раз, что и вызывает экстремальную концентрацию первоначально запасенной пузырьком энергии. Основной диаметр пузырьков пара (Main diameter) в уравнении Рэлея-Плессета выбран 2×10^{-6} м, давление насыщенных паров (Saturation Pressure) с учетом температуры моделируемой жидкости 25°С $p_н$ = 3170 Па. Остальные параметры моделирования, выбранные по умолчанию, считаются стандартными для большинства кавитационных течений.

В качестве исходного образца выбрано комбинированное сопло, состоящее из трех участков (рис. 2*а*). Первый — конусный сходящийся участок с углом θ_1=14° заканчивается цилиндрической частью внутренним диаметром d_0 = 2мм и длиной s = 1,75d_0. Третий участок конусной формы имеет угол раскрытия θ_2=45°. Истечение жидкости происходит в затопленное пространство (рис. 2 *b*), противодавление в котором задается в препроцессоре CFX и для всех расчетных моделей составляет 0,5 МПа. Сеточная модель тетраэдрического типа сгенерирована общим числом элементов 1,28 млн. Исследуемая жидкость — вода, плотностью ρ=1000 кг/м^3 при температуре T=25°С. Массовый расход через гидродинамическую систему 0,45 кг/с выбирался с учетом того, что полное давление по оси струи при реальном эрозийном использовании кавитационного потока составляет p_t ≈ 10–15 МПа.

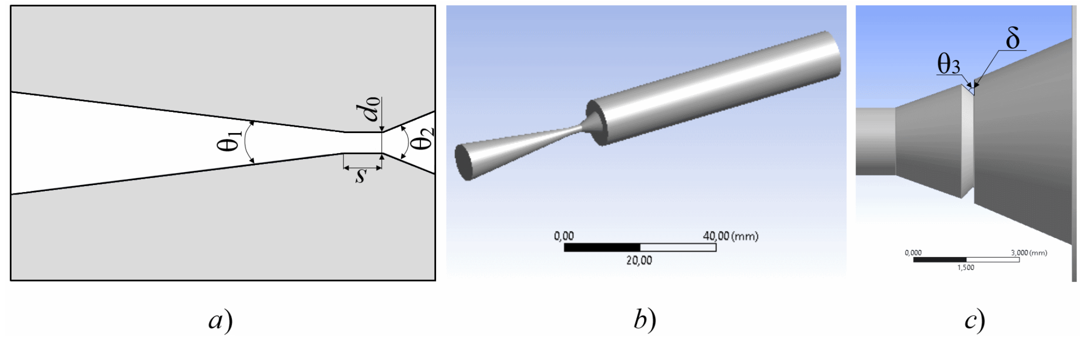


Рис. 2. Геометрия комбинированного сопла
а — схема проточной части кавитатора; *b* — внешний вид модели;
с — внутренний дефект расходящегося конусного участка
Fig. 2. Combined nozzle geometry
a — diagram of cavitator liquid end; b — model appearance;
c — internal defect of combined nozzle conical pattern

Наличие повреждений моделировалось на внутренней поверхности расходящегося конусного участка (рис. 2 *с*). Дефект в сечении представлял равнобедренный треугольник с углом θ_3=45° между равными сторонами δ. Вершина треугольника с углом θ_3 может находиться снаружи или внутри выходного конуса, тем самым уменьшая его объем.

Результаты исследования. На рис. 3 *а* представлен график зависимости объемной доли содержания пара от расстояния вдоль оси струи x для различных значений δ стороны треугольного дефекта. Начало координат соответствует началу цилиндрического участка. Для всех δ зависимость $w = f(x)$ имеет максимум, который с увеличением δ приближается к цилиндрическому участку. В случае с идеальным соплом (кривая 1 на рис. 3 *а*) максимум содержания паровой фазы в объеме приходится на значение w = 0,6, которое незначительно меняется при наличии в выходном конусе наружного дефекта (кривая 2 на рис. 3*а*). С увеличением объема расходящегося конуса за счет треугольного выступа распределение $w = f(x)$ заметно отличается от идеального случая только во второй части кавитационного «факела». Это отклонение в основном связано с изменением формы и не влияет на максимум концентрации пара и длину кавитационной области. Поэтому на рис. 3 *а* показана только одна зависимость $w = f(x)$ сопла с наружным дефектом δ=0,5мм. Для остальных значений δ кривые на графике плотно располагаются и мало отличимы.

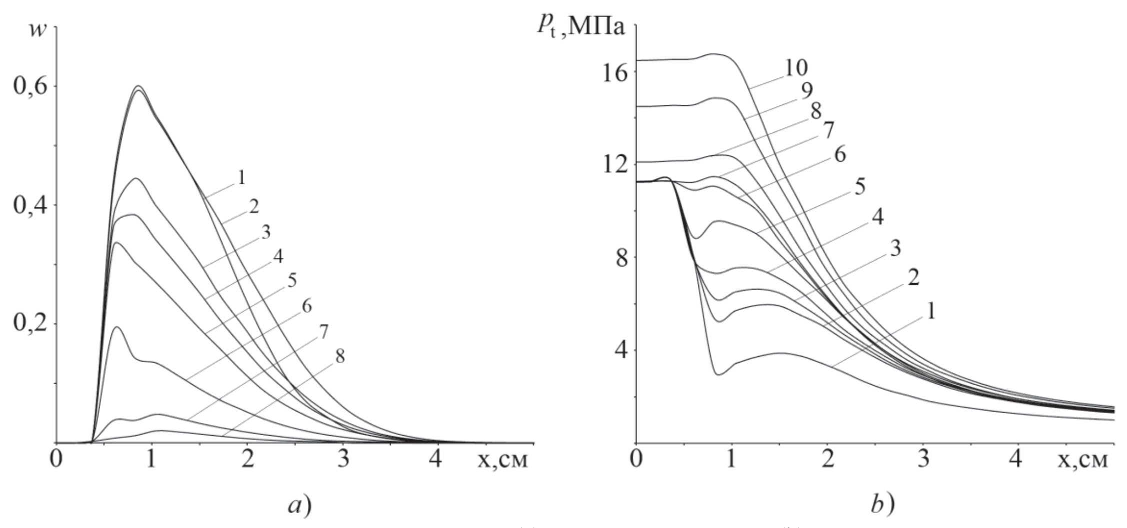


Рис. 3. Зависимость объемной доли содержания пара *w* (a) и полного давления p_t (b) от расстояния вдоль оси струи *x* при различной величине дефекта δ, измеряемого в мм: 1 — 0; 2 — 0,5 (дефект наружу); 3 — 0,3; 4 — 0,4; 5 — 0,5; 6 — 0,7; 7 — 0,8; 8 — 0,85; 9 — 0,9; 10 — 1

Fig. 3. Dependence of volume fraction of vapor content *w* (a) and total pressure p_t (b) on distance along jet X-axis for various defect values δ in mm; 1–0; 2–0.5 (defect out); 3–0.3; 4–0.4; 5–0.5; 6–0.7; 7–0.8; 8–0.85; 9–0.9; 10–1.

Образование треугольного дефекта с вершиной внутрь объема расходящегося конуса снижает развитие кавитации, а при величине $\delta = 0{,}5d_0$ полностью подавляет ее. Максимум содержания пара в потоке жидкости падает и при δ = 1мм составляет менее 0,001%. С увеличением δ длина кавитационной зоны *l* меняется неравномерно (рис. 4) и по характеру спада не повторяет *w*. При значениях $\delta < 0{,}2d_0$ *l* незначительно возрастает, а в интервале $0{,}2 < \delta < 0{,}4d_0$ остается равной длине кавитационного «факела» идеального сопла. Дальнейшее увеличение δ приводит к резкому сокращению области кавитации и $l \approx 0$ при $\delta = 0{,}5d_0$.

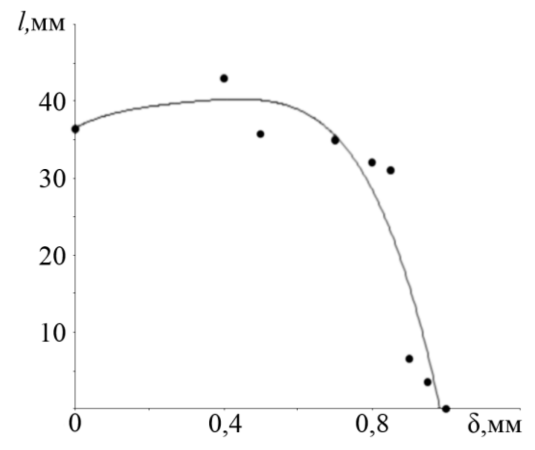


Рис. 4. Зависимость длины кавитационной области *l* от величины дефекта δ

Fig.4 Dependence of cavitation region length l on defect value δ

Подобная закономерность наблюдается и для зависимости полного давления потока жидкости p_t от расстояния вдоль оси струи (рис. 3 *b*). Поскольку постоянной величиной в моделировании принят массовый расход, полное давление является функцией переменной, зависящей от кавитации струйного истечения. Наличие дефектов в выходном конусе сопла размером $\delta < 0{,}4d_0$ не влияет на величину p_t на цилиндрическом участке (кривые 1–7 на рис. 3 *b*) и качественно повторяет зависимость $p_t = f(x)$ идеально выполненного кавитатора, имея резкий спад после начала зарождения кавитации. Он достигает своего минимума в точке наибольшего значения *w* (рис. 3 *a*). Далее происходит плавное выравнивание p_t независимо от величины дефекта. Если же $\delta > 0{,}4d_0$, входное давление заметно возрастает (кривые 8–10 на рис. 3 *b*) и на протяжении всего сопла остается постоянным.

Таким образом, можно выделить две фазы течения кавитационной струи в неидеальном кавитаторе. На первом этапе, когда величина внутреннего дефекта менее $0{,}4d_0$, активное зарождение кавитационных пузырьков начинается непосредственно в конце цилиндрической части сопла, а длина кавитационной области слабо зависит от значения δ. Появление выступа, по сравнению с идеальным конусным участком, снижает объемную

долю содержания пара и спад полного давления в области зарождения кавитации. Второй этап течения при наличии дефекта $\delta > 0{,}4d_0$ характеризуется быстрым уменьшением длины области кавитации и концентрации паровой фазы практически до нуля. Уже при $\delta = 0{,}5d_0$ кавитация полностью подавляется внутри сопла, при этом полное давление возрастает внутри кавитатора и на выходе из него.

Кавитация в потоке жидкости наблюдается в местах быстрого изменения скорости течения жидкости, которое влечет за собой уменьшение давления. При постоянных значениях массового расхода величины противодавления в камере истечения струи для несжимаемой жидкости распределение скоростей потока будет определять характер зарождения, роста и схлопывания кавитационных пузырьков. На рис. 5 представлены поля скоростей жидкости для фазы течения с развитой кавитационной областью в идеальном кавитаторе (рис. 5 *a*) и при наличии выступа размером $\delta = 0{,}25d_0$ (рис. 5 *b*), а также для переходного процесса $\delta = 0{,}4d_0$ (рис. 5*c*) и подавления кавитации при $\delta = 0{,}5d_0$ (рис. 5 *d*). Расположение области максимальных скоростей изменяется от величины дефекта кавитатора, при этом остается постоянным на уровне 200–180 м/с. Для случая развитой кавитации жидкость достигает максимальной скорости в конце цилиндрического участка и уменьшается в расширяющемся участке гидродинамического устройства. Появление препятствия потоку приводит к появлению второй области повышенных скоростей, которая с увеличением размеров дефекта преобладает над снижающейся скоростью на входе в конусный участок.

Согласно уравнению (1) для несжимаемой жидкости процесс кавитации определяется локальным давлением жидкости, которое в CFD-решателе является абсолютным и равно

$$p_{abs} = p_{stat} + p_{ref}, \tag{2}$$

где p_{stat} — статическое давление жидкости, p_{ref} — опорное давление, относительно которого измеряются любые давления, установленные в моделировании. В свою очередь, полное давление равно

$$p_t = p_{stat} + p_{dyn}, \tag{3}$$

где $p_{dyn} = \dfrac{\rho \upsilon^2}{2}$ — динамическое давление жидкости, которое при постоянных значениях максимальной скорости υ не вносит вклад в падение полного давления для дефекта $\delta < 0{,}4d_0$ (кривые 1–6 на рис. 3,*b*). Распространение струи в затопленном пространстве при зарождении кавитации происходит в среде с переменной плотностью, зависящей от концентрации пузырьков газа или пара. При понижении статического давления на выходе из цилиндрического участка кавитатора до величины давления насыщенного пара $p_н$ резко увеличивается объем газо-жидкостной смеси за счет образования пузырьков, что в изотермических условиях течения приводит к дополнительному снижению давления и усилению кавитации. Появление препятствия потоку уменьшает скорость течения в цилиндрическом участке и исключает возможность появления кавитации, нивелируя и падение давления при образовании пузырьков пара, что согласно (2) и (3) отображается на зависимостях $w = f(x)$ и $p_t = f(x)$ (рис. 3).

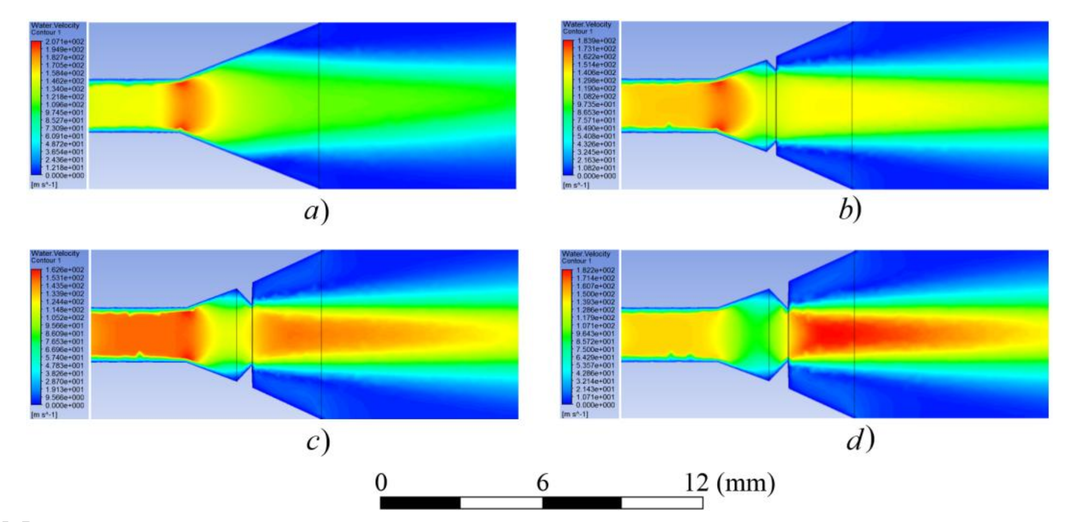


Рис. 5. Распределение скорости потока жидкости в среднем сечении кавитатора при различных значениях стороны треугольного дефекта: *a* — $\delta = 0$, *b* — $\delta = 0{,}5$ мм, *c* — $\delta = 0{,}8$ мм, *d* — $\delta = 1$ мм

Fig. 5. Distribution of fluid flow rate in cavitator midsection at various values of triangular defect side: a – δ = 0, b – δ = 0.5 mm, c – δ = 0.8 mm, d – δ = 1 mm

Обсуждение и заключение. Влияние единичного дефекта на внутренней поверхности расходящегося конусного участка на гидродинамические параметры истечения струи воды в кавитационном режиме можно разделить на две стадии. При небольших размерах (менее 0,4 части от диаметра цилиндрического участка кавитатора) сохраняются геометрические параметры кавитационной области, однако концентрация паровой фазы и полное давление уменьшаются. Наличие таких дефектов трудно выявить визуально без дополнительных количественных измерений. Они не нарушают симметрию струи, но снижают ее эрозийную способность. Во втором случае, если внутренний выступ относительно большой (более 0,4 части от диаметра цилиндрического участка кавитатора), происходит резкий спад объемной доли паровой фазы в затопленной струе до полного прекращения кавитации. При этом на выходе из гидродинамического устройства полное давление струи возрастает ввиду отсутствия снижения статического давления за счет образования пузырьков пара.

Таким образом, полученные в работе результаты способствуют усовершенствованию конструкций гидродинамических кавитаторов и улучшению их эрозийного воздействия при использовании кавитации для очистки подводных конструкций и механизмов.

Библиографический список

1. Rayleigh, L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity / L. Rayleigh // Journal of Philosophical Magazine. — 1917. — Vol. 34. — P. 94 – 98.

2. Plesset, M.S. A non-steady heat diffusion problem with spherical symmetry / M. S. Plesset, S.A. Zwick // Journal of Applied Physics. — 1952. — Vol. 23, iss. 1. — P. 95 – 98.

3. Mohammadein, S. A. Temperature distribution in a mixture surrounding a growing vapour bubble / S. A. Mohammadein, S.A. Gouda // Journal of Heat and Mass Transfer. — 2006. — Vol.42, iss. 5. — P. 359 – 363.

4. Hong Liu. A novel model for the bubble growth in the cavitation region of an injector nozzle / Hong Liu, Chang Cai, Xi Xi, Yan'an Yan, Ming Jia // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2018. — Vol. 119. — P. 128–138.

5. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ. — 2008. — Т. 14, № 4. — С. 861–869.

6 Промтов, М. А. Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // Вестник ТГТУ. — 2013. — Т. 19, № 3. — С. 562–569.

7. Yunhua, J. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator / J. Yunhua, B.Tao, G.Ye // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 142. — P. 87–93.

8. Byoung-Kwon, Ahn. Experimental investigation of supercavitating flows / Byoung-Kwon Ahn, Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup Lee // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2012. — Vol. 4, iss. 2. — P. 123 – 131.

9. Pendar, M. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models / M. R. Pendar, E. Roohi // Ocean Engineering. — 2016. — Vol. 112. — P. 287–306.

10. Ye-jun, G. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators / G. Ye-jun, Zh. Jie-min, L. Tian-zeng // Journal of hydrodynamics. — 2016. — Vol. 28, iss. 3. — P.431 — 441.

11. Ebrahim, K. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model / K. Ebrahim, K. Erfan, J. Khodayar, J. Seyyed Morteza // Applied Mathematical Modelling. — 2017. — Vol. 45. — P. 165 — 178.

12. Young Kyun Kwack. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators / Young Kyun Kwack, Sung Ho Ko // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. – 2013. – Vol. 5, iss. 3. – P. 325 – 332.

13. Авраменко, А. Н. Численное моделирование процесса обработки водотопливной эмульсии в бортовом гидродинамическом кавитаторе / А. Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2016. — № 1. — С. 63 – 71.

14. Zuo-Yu Sun. Numerical investigation on effects of nozzle's geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector's nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine / Zuo-Yu Sun, Guo-Xiu Li, Chuan Chen, Yu-Song Yu, Guo-Xi Gao // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 89, iss. 1. — P. 843–861.

15. Deng, L. Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets / L. Deng, K. Yong, W. Xiaochuan, D. Xiaolong, F. Zhenlong // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2016. — Vol. 74. — P. 444 – 452.

16. Dular, M. On the mechanisms of cavitation erosion-coupling high speed videos to damage patterns / M. Dular, M. Petkovsek // Experimental Thermal and Fluid Science. — 2015. — Vol. 69. — P. 359-370.

17. Hattori, S. Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles / S. Hattori, E. Nakao // Wear. — 2002. — Vol. 249. — P. 839 — 845.

18. Родионов, В. П. Струйная суперкавитационная эрозия / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2005. — 223 с.

19. Родионов, В. П. Закономерности кавитационной эрозии конструкционных материалов / В. П. Родионов, А. И. Уколов // Вестник Дагест. гос. техн. ун-та. Технические науки. — 2017. — Т.44, №3. — С. 39–47.

20. Ладенко, А. А. Суперкавитационная технология очистки систем водоотведения / А. А. Ладенко, В. П. Родионов, Н. В. Ладенко // Научно-технический журнал «Энергоснабжение и водоотведение». — 2016. — Т. 103, №5. — С. 77–79.

21. Родионов, В. П. Суперкавитационная струйная экотехнология водолазных работ / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2015. — 160 с.

22. Родионов, В. П. Энергосберегающие технологии очистки / В. П. Родионов, В. М. Лось. — Москва: Компания Крона-плюс, 2004. — 136с.

23. Гидрокавитационный генератор: патент №1614241 Российская Федерация: B 0F /00, B 08 B 03/12 / В. П. Родионов. — №4339321; заявл. 2.11.87; опубл. 24.05.93.

24. Гидродинамический стенд: патент №43069 Российская Федерация / В. М. Лось, В. П. Родионов, В. М. Курихин. — № 2004121579; заявл. 21.07.04; опубл. 27.12.04.

25. Лось, В. М. Гидродинамические установки высокого давления / В. М. Лось, В. П. Родионов. — Москва,2006. — 136 с.

26. ANSYS CFX. Computer simulation helps design more efficient water pumps // World Pumps. — 2004. — Vol. 453. — P. 32–34.

27. Tsutsumi, K. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model / K. Tsutsumi, S. Watanabe, S. Tsuda, T. Yamaguchi // European journal of mechanics - B/Fluids. — 2017. — Vol. 61, iss 2. — P. 263—270.

28. Алексенский, В. А. Расчетное определение кавитационных характеристик центробежных насосов / В. А. Алексенский, А. А. Жарковский, П. В. Пугачев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13, №1 (2). — С. 411–414.

29. Уколов, А. И. Моделирование колеса центробежного насоса с максимальным эффектом кавитации / А. И. Уколов, В. П. Родионов, П. П. Старовойтов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — №5. — С. 910–919.

30. Кулагин, В. А. Гидрогазодинамика: электрон. учеб. пособие / В. А. Кулагин, Е. П. Грищенко. — Красноярск: ИПК СФУ, 2009. — 278 с.

31. Petkovsek, M. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration / M. Petkovsek, M. Mlakar, M. Levstek et al. // Ultrasonics Sonochemistry. — 2015. — Vol. 26. — P. 408—414.

32. Оптимизационное проектирование проточной части магистрального нефтяного насоса с использованием TURBO инструментов ANSYS / С. Г. Валюхов [и др.] // Насосы. Турбины. Системы. — 2015. — Т. 14, № 1. — С. 56–68.

References

1. Rayleigh, L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. Journal of Philosophical Magazine, 1917, vol. 34, pp. 94 – 98.

2. Plesset, M.S., Zwick, S.A. A non-steady heat diffusion problem with spherical symmetry. Journal of Applied Physics, 1952, vol. 23, iss. 1, pp. 95 – 98.

3. Mohammadein, S.A., Gouda, S.A. Temperature distribution in a mixture surrounding a growing vapour bubble. Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, vol. 42, iss. 5, pp. 359 – 363.

4. Hong Liu, Chang Cai, Xi Xi, Yan'an Yan, Ming Jia. A novel model for the bubble growth in the cavitation region of an injector nozzle. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, vol. 119, pp. 128–138.

5. Promtov, M.A. Perspektivy primeneniya kavitatsionnykh tekhnologiy dlya intensifikatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov. [Prospects of Cavitation Technologies Application for Intensification of Chemical Technological Processes.] Transactions of TSTU, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861–869 (in Russian).

6 Promtov, M.A., Stepanov, A.Yu., Aleshin, A.V. Kharakteristiki potoka zhidkosti v kanalakh protochnykh gidrodinamicheskikh staticheskikh kavitatorov. [Characteristics of fluid flow in the channels of circulating hydrodynamic static cavitators.] Transactions of TSTU, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 562–569 (in Russian).

7. Yunhua, J., Tao, B., Y, G. Formation and steady flow characteristics of ventilated supercavity with gas jet cavitator. Ocean Engineering, 2017, vol. 142, pp. 87–93.

8. Byoung-Kwon Ahn, Tae-Kwon Lee, Hyoung-Tae Kim, Chang-Sup Lee. Experimental investigation of supercavitating flows. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012, vol. 4, iss. 2, pp. 123 – 131.

9. Pendar, M.R., Roohi, E. Investigation of cavitation around 3D hemispherical head-form body and conical cavitators using different turbulence and cavitation models. Ocean Engineering, 2016, vol. 112, pp. 287–306.

10. Ye-jun, G., Jie-min, Zh., Tian-zeng, L. Numerical investigation of the effect of rotation on cavitating flows over axisymmetric cavitators. Journal of hydrodynamics, 2016, vol. 28, iss. 3, pp. 431 — 441.

11. Ebrahim, K., Erfan, K., Khodayar, J., Seyyed Morteza, J. The investigation of natural super-cavitation flow behind three- dimensional cavitators: Full Cavitation Model. Applied Mathematical Modelling, 2017, vol. 45, pp. 165 — 178.

12. Young Kyun Kwack, Sung Ho Ko. Numerical analysis for supercavitating flows around axisymmetric cavitators. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, vol. 5, iss. 3, pp. 325 – 332.

13. Avramenko, A.N. Chislennoe modelirovanie protsessa obrabotki vodotoplivnoy emul'sii v bortovom gidrodinamicheskom kavitatore. [Numerical problem of process of influence water-fuel emulsion in on-board hydrodynamic cavitator.] Internal Combustion Engines, 2016, no. 1, pp. 63 – 71 (in Russian).

14. Zuo-Yu Sun, Guo-Xiu Li, Chuan Chen, Yu-Song Yu, Guo-Xi Gao. Numerical investigation on effects of nozzle’s geometric parameters on the flow and the cavitation characteristics within injector’s nozzle for a high-pressure common-rail DI diesel engine. Energy Conversion and Management, 2015, vol. 89, iss. 1, pp. 843–861.

15. Deng, L., Yong, K., Xiaochuan, W., Xiaolong, D., Zhenlong, F. Effects of nozzle inner surface roughness on the cavitation erosion characteristics of high speed submerged jets. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, vol. 74, pp. 444 – 452.

16. Dular, M., Petkovsek, M. On the mechanisms of cavitation erosion-coupling high speed videos to damage patterns. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, vol. 69, pp. 359-370.

17. Hattori, S., Nakao, E. Cavitation erosion mechanisms and quantitative evaluation based on erosion particles. Wear, 2002, vol. 249, pp. 839 — 845.

18. Rodionov, V.P. Struynaya superkavitatsionnaya eroziya. [Jet supercavitating erosion.] Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2005, 223 p. (in Russian).

19. Rodionov, V.P., Ukolov, A.I. Zakonomernosti kavitatsionnoy erozii konstruktsionnykh materialov. [The laws of cavitation erosion of construction materials.] Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences. 2017, vol. 44, no. 3, pp. 39–47 (in Russian).

20. Ladenko, A.A., Rodionov, V.P., Ladenko, N.V. Superkavitatsionnaya tekhnologiya ochistki sistem vodootvedeniya. [Superhydrocavitational technology of cleaning of systems of water disposal.] Energy Saving and Water Removal, 2016, vol. 103, no. 5, pp. 77–79 (in Russian).

21. Rodionov, V.P. Superkavitatsionnaya struynaya ekotekhnologiya vodolaznykh rabot. [Supercavitational jet diving ecotechnology.] Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2015, 160 p. (in Russian).

22. Rodionov, V.P., Los, V.M. Energosberegayushchie tekhnologii ochistki. [Energy-saving cleaning technologies.] Moscow: Kompaniya Krona-plyus, 2004, 136 p. (in Russian).

23. Rodionov, V.P. Gidrokavitatsionnyy generator: patent №1614241 Rossiyskaya Federatsiya. [Hydrocavitational generator] Patent RF, no. 1614241, 1993 (in Russian).

24. Los, V.M., Rodionov, V.P., Kurikhin, V.M. Gidrodinamicheskiy stend: patent №43069 Rossiyskaya Federatsiya. [Hydrodynamic stand.] Patent RF, no. 43069, 2004 (in Russian).

25. Los, V.M. Rodionov, V.P. Gidrodinamicheskie ustanovki vysokogo davleniya. [High-pressure hydrodynamic plants.] Moscow, 2006, 136 p. (in Russian).

26. ANSYS CFX. Computer simulation helps design more efficient water pumps. World Pumps, 2004, vol. 453, pp. 32–34.

27. Tsutsumi, K., Watanabe, S., Tsuda, S., Yamaguchi, T. Cavitation simulation of automotive torque converter using a homogeneous cavitation model. European journal of mechanics - B/Fluids. 2017, vol. 61, iss 2, pp. 263—270.

28. Aleksensky, V.A., Zharkovsky, A.A., Pugachev, P.V. Raschetnoe opredelenie kavitatsionnykh kharakteristik tsentrobezhnykh nasosov. [Calculation definition of centrifugal pumps cavitational characteristics.] Izvestia RAS SamSC, 2011, vol. 13, no. 1(2), pp. 411–414 (in Russian).

29. Ukolov, A.I., Rodionov, V.P., Starovoytov, V.P. Modelirovanie kolesa tsentrobezhnogo nasosa s maksimal'nym effektom kavitatsii. [Simulation of centrifugal pump impeller with maximum cavitation effect.] Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2017, no. 5, pp. 910–919 (in Russian).

30. Kulagin, V.A., Grishchenko, E.P. Gidrogazodinamika: elektron. ucheb. Posobie. [Fluid and gas dynamics.] Krasnoyarsk: IPK SFU, 2009, 278 p. (in Russian).

31. Petkovsek, M., Mlakar, M., Levstek, M., et al. A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, vol. 26, pp. 408—414.

32. Valyukhov, S.G., et al. Optimizatsionnoe proektirovanie protochnoy chasti magistral'nogo neftyanogo nasosa s ispol'zovaniem TURBO instrumentov ANSYS. [Optimising design of the flowing part of the main oil pump with use of TURBO of the ANSYS tools.] Pumps. Turbines. Systems. 2015, vol. 14, no. 1, pp. 56–68 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.03.2018
Сдана в редакцию 18.03.2018
Запланирована в номер 15.04.2018

Received 14.03.2018
Submitted 18.03.2018
Scheduled in the issue 15.04.2018

Сведения об авторах:

Уколов Алексей Иванович,
доцент кафедры «Математика, физика и информатика» Керченского государственного морского технологического университета (РФ, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82), кандидат физико-математических наук,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2467-3379
ukolov_aleksei@mail.ru

Родионов Виктор Петрович,
профессор кафедры «Гидравлика» Кубанский государственный технологический университет (РФ, г. Краснодар, ул. Московская, 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-7298
vik-rodio@yandex.ru

Authors:

Ukolov, Alexey I.,
associate professor of the Mathematics, Physics and Computer Science Department, Kerch State Marine Technological University (RF, Republic of Crimea, Kerch, ul. Ordzhonikidze, 82), Cand.Sci. (Phys.-Math.),
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2467-3379
ukolov_aleksei@mail.ru

Rodionov, Victor P.,
professor of the Hydraulics Department, Kuban State Technological University (RF, Krasnodar, ul. Moskovskaya, 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8130-7298
vik-rodio@yandex.ru